

Бистабильность и пороговый гистерезис в электролюминесценции кремния

В туннельных кремниевых диодах металл-окисел-полупроводник при комнатной температуре обнаружена конденсация инжектированной электронно-дырочной плазмы в плотное состояние. При изменении тока диодов наблюдается бистабильность либо пороговый гистерезис рекомбинационного излучения плазмы, связанные с пороговым образованием зародышей плазмы.

В спектрах электролюминесценции туннельных кремниевых диодов металл-окисел-полупроводник в условиях туннельной инжекции неравновесных носителей наблюдается линия рекомбинационного излучения электронно-дырочной плазмы при температуре диодов $T \approx (300 \div 350) \text{ K}$ ^{1,2}. Спектральное положение линии излучения показывает, что при слабом нагреве диодов реализуется аномально сильное уменьшение ширины запрещенной зоны полупроводника внутри плазмы. Неожиданно высокий квантовый выход люминесценции ($10^{-3} \div 10^{-2}$) и необычные спектральные особенности линии излучения можно интерпретировать как результат конденсации инжектированной электронно-дырочной плазмы в плотное состояние. В кремнии, легированном бором, в сильном электрическом поле обнаружена конденсация электронно-дырочной плазмы в плотный плазменный шнур или плотные плазменные шнуры, которая сопровождается появлением отрицательного дифференциального сопротивления диодов^{1,2}. Отрицательное дифференциальное сопротивление диодов может быть связано с заполнением валентной зоны Γ_7 горячими дырками с высокой подвижностью. Заполнение валентной зоны Γ_7 приводит к появлению новой линии в спектре рекомбинационного излучения. При изменении тока диодов обнаружен пороговый оптический гистерезис в зависимости интенсивности излучения от тока диодов. В области порога возникновения излучения плотной плазмы интенсивность излучения при возрастающем токе оказалась существенно меньше интенсивности излучения при уменьшающемся токе. Этот результат объясняется тем, что при изменении тока инжекции плотный плазменный шнур появляется и исчезает пороговым образом. При этом плотность электронно-дырочного газа, определяющая порог возникновения или исчезновения зародыша плотной плазмы, оказывается различной при возрастающем или уменьшающемся токе инжекции. Для некоторых диодов в кремнии, легированном бором, наблюдается бистабильная вольт-амперная характеристика и бистабильная зависимость интенсивности излучения от тока диодов (рис.1)². В этом случае переключение диода из одного состояния в другое сопровождается скачкообразным переключением интенсивности излучения. Этот результат можно объяснить бистабильностью состояния плотной плазмы и условий ее зарождения. В одном из состояний в сильном электрическом поле реализуется плазменный шнур или плазменные шнуры малого диаметра и электронно-дырочный газ малой плотности вне плазменного шнура. В другом состоянии в слабом электрическом поле образуется плазменный шнур большого диаметра и электронно-дырочный газ большой плотности вне плазменного шнура. В кремнии, легированном фосфором, обнаружена конденсация электронно-дырочной плазмы в плотные поверхностные плазменные капли. При этом в зависимости интенсивности излучения от тока диодов также наблюдается пороговый оптический гистерезис (рис.1), связанный с пороговым характером зарождения и исчезновения плотной плазмы². Отрицательное дифференциальное сопротивление диодов в этом случае не возникает.

Конденсация электронно-дырочной плазмы в кремнии объясняется тепловым уменьшением ширины запрещенной зоны полупроводника при локальном перегреве решетки внутри плотной плазмы (рис.2). Локальный перегрев решетки, создаваемый плазмой, обусловлен генерацией фононов при рекомбинации электронов и дырок и джоулевым теплом. Отрицательная теплоемкость электронно-дырочной плазмы, возникающая в кремнии при температуре $T > 320 \text{ K}$, концентрация входной мощности диода в электронно-дырочной плазме и слабая диффузия фононов в кремнии при высоких температурах представляют собой основные причины и условия конденсации плазмы². Поскольку скорость генерации фононов и температура решетки в плазме возрастают при увеличении плотности плазмы, средняя энергия электронно-дырочных пар при

отрицательной теплоемкости плазмы уменьшается с ростом плотности пар вплоть до плотности, при которой начинается вырождение плазмы. Таким образом, при высоких температурах электронно-дырочная плазма в кремнии создает притягивающий потенциал, вызывающий образование плазменных шнуров или плазменных капель с плотностью пар $n > 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Конденсация электронно-дырочной плазмы в кремнии представляет собой явление самокомпрессии, напоминающее сжатие звездной материи под действием гравитации. Обнаружение самокомпрессии электронно-дырочной плазмы в кремнии открывает реальные возможности для создания кремниевой оптоэлектроники.

Алтухов П.Д., Кузьминов Е.Г. Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН

Труды конференции «Фундаментальные Проблемы Оптики», Международный Оптический Конгресс «Оптика – XXI век», Санкт-Петербург, 14 – 17 октября 2002 г., с. 48-50;

Рис.1. Зависимость напряжения на диоде V_g ,

Рис.2. Распределение плотности плазмы n , избыточ-температуры решетки в плазме T_g , спектральной ной температуры $T_g - T$ и ширины запрещенной зоны температуры T' и интенсивности излучения I от E_g в плазменных шнурах или плазменных каплях в тока диода J° кремнии².

-
- ¹ P. D. Altukhov, E. G. Kuzminov, *Solid State Communications* **111**, 379 (1999).
 - ² P. D. Altukhov, E. G. Kuzminov, *Physica Status Solidi (b)*, **232**, 364 (2002).